

ZUM FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSVERHALTEN
VON BETON BEI INSTATIONÄREM UMGEBUNGSKLIMA

ARBEITSBERICHT II/2

Versuchseinrichtung und erste Ergebnisse

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina
Dipl.-Ing. H. Budelmann

Februar 1984

Untersuchung im Auftrag der DFG:

Schwerpunktprogramm "Stoffgesetze im konstruktiven Ingenieurbau"

Az.: Ko 204/34

INHALTSVERZEICHNIS

1. Allgemeines

2. Versuchsprogramm

2.1 Klima- und Lastgeschichten für Kriechversuche

2.2 Begleituntersuchungen

2.3 Betonzusammensetzungen

2.4 Herstellung und Lagerung der Probekörper

3. Kriechversuchsstände

3.1 Bau von Versuchsständen

3.2 Wegmeßsystem

3.3 Erprobung, Vorversuche

4. Erste Versuchsergebnisse

4.1 Kriechen

4.2 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten

1. Allgemeines

Aus der Literatursichtung zum Kriechen von Beton bei erhöhter Temperatur bis ca. 100 °C wurden Schlüsse für notwendige Untersuchungen gezogen. Dementsprechend soll der Schwerpunkt der geplanten bzw. bereits laufenden Versuche auf das Kriechen bei "instationärer" Temperatureinwirkung gelegt werden. Da die Betonfeuchtigkeit einen wesentlichen Einfluß auf das Kriechen ausübt, sollen die Versuche bei verschiedenen hohen, sowohl konstanten als auch sich verändernden Feuchtigkeiten durchgeführt werden. Seitens der Betonzusammensetzung sind nach den Ergebnissen der Literatursichtung besonders der W/Z-Wert und die Zuschlagart von Wichtigkeit. Da der Einfluß des W/Z-Wertes versuchstechnisch schwer separierbar ist, wird er - auch zur Begrenzung des Versuchsprogramms - als Parameter zunächst ausgeklammert. Als Zuschlag sollen Quarzkies und Kalkstein verwendet werden.

Um die Rolle der Betonfeuchte beim Kriechprozeß im zu untersuchenden Temperaturbereich zu erhellen, sind die Feuchtezustände und -transportvorgänge bei erhöhter Temperatur zu definieren bzw. zu erfassen. Darüber hinaus sind Art und Umfang der in diesem Temperaturbereich auftretenden Strukturveränderungen darzustellen. Da dieser letztgenannte Teil der Arbeit zum Berichtstermin noch nicht abgeschlossen werden konnte, wird über ihn später berichtet werden.

Dieser Arbeitsbericht erläutert das Versuchsprogramm und berichtet über Bau und Erprobung der Kriechversuchsstände. Des weiteren stellt er erste Versuchsergebnisse zum Kriechen einschließlich der durchgeführten Begleituntersuchungen vor. Da es sich zunächst hauptsächlich um die Basisversuche bei stationärer Klimaeinwirkung handelt, erfolgt die ausführliche Berichterstattung der Ergebnisse im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Versuche für instationäre Klimaeinwirkung.

2. Versuchsprogramm

2.1 Klima- und Lastgeschichten für Kriechversuche

Meerwasserentsalzungsanlagen, Kläranlagen, Warmwasserbecken als Wärmespeicher, Kühltürme und andere Bauwerke werden im Betrieb erhöhter Temperatur unterhalb von 100 °C und Temperaturänderungen unterworfen. Dabei herrscht häufig hohe Luftfeuchtigkeit. Außerdem sind die Bauteile vergleichsweise feingliedrig. Die genannten klimatischen Beanspruchungen sind durch den derzeitigen Kenntnisstand, der in der Literatursichtung dargestellt wurde, nicht abgedeckt.

Deshalb sollen in dieser Untersuchung für die genannten Bauwerke zutreffende Klimabeanspruchungen erzeugt werden. In Bild 7 dargestellte Sorptionsisothermen sind beim Verständnis der folgenden Unterscheidung behilflich:

a) Beton soll auf definierte Feuchteniveaus austrocknen. Dazu wird z.B. bei 20/65 bis zur näherungsweisen Ausgleichsfeuchte vorgelagerter Beton bei Konstanthaltung der relativen Feuchtigkeit auf eine höhere Temperatur aufgeheizt. Dabei trocknet er auf eine geringere Feuchte aus (s. Bild 7 (a)). Dieser Vorgang wird auch zyklisch durchgeführt.

b) Die sich aus einer Vorlagerung z.B. bei 20/65 ergebende verdampfbare Wassermenge im Beton soll beim Aufheizen möglichst weitgehend konstant gehalten werden. Daraus ergibt sich beispielsweise die Klimakombination 55/95 (s. Bild 7 (b)). Auch hierfür sind Zyklen vorgesehen. Selbstverständlich ist nur eine annähernde Konstanthaltung der verdampfbaren Wassermenge möglich.

Die Bilder 8 und 9 zeigen die gewählten Klimageschichten für die Kriechversuche. In den ersten Versuchsreihen hat sich gezeigt, daß es für eine exakte Feuchterege lung vorteilhaft ist, die un-

tersuchte Obertemperatur von 95 °C auf ca. 85 - 90 °C zu reduzieren. Zudem sinkt dadurch die Störanfälligkeit der Klimaaggregate erheblich. Abhängig vom weiteren Verlauf soll die Untersuchung auf eine zusätzliche, zwischen 20 und 90 °C liegende Temperatur ausgedehnt werden.

Als "stationäre Temperatureinwirkung" werden nach Bild 8 jene Versuche bezeichnet, in denen die Belastung der Probekörper erst im aufgeheizten Zustand erfolgt. Wird im belasteten Zustand aufgeheizt, wird die Temperatureinwirkung als "instationär" bezeichnet (s. Bild 9), unabhängig davon, ob im Anschluß Temperaturzyklen folgen oder ob die Temperatur dann in konstanter Höhe einwirkt. Die Belastungsdauer beträgt zwischen 30 und 40 Tagen. Die verzögert-elastische Rückverformung wird ca. 20 Tage beobachtet, in einigen Serien während noch erhöhter Temperatur, in anderen nach der Abkühlung (Bild 10). Der Belastungsgrad liegt in allen Serien bei 30 % der Zylinderdruckfestigkeit im Belastungsalter. Die Kriechversuche 90/65 stationär und 90/94 stationär sowie 90/94 instationär/Zyklen wurden in der vergangenen Förderperiode durchgeführt. Ergebnisse hierzu sind in Abschnitt 4 dargestellt.

2.2 Begleituntersuchungen

An unbelasteten Probekörpern, die den Kriechkörpern gleichen und die denselben Klimageschichten unterworfen werden, werden die lastunabhängigen thermischen und hygrischen Verformungen gemessen. Außerdem finden Kriechversuche bei weitergeführtem, klimatischem Ausgangszustand 20/65 und 20/94 statt. Zu diesem Zweck wurden separate Versuchsstände errichtet. Bild 1 zeigt einen solchen Kriechversuchsstand mit angesetztem Behälter, in dem über einer Salzlösung relative Luftfeuchtigkeiten eingestellt werden können.

Vor Beginn der Kriechversuche werden an Hohlzylindern $d = 15 \text{ cm}$ vollständige Spannungs-Dehnungslinien bis zum Bruch erstellt und

später mit denen verglichen, die an den Kriechkörpern nach Abschluß der Versuche ermittelt werden. Auf diesem Wege ist auch die Restfestigkeit der Kriechkörper nach Abschluß der Versuche bekannt.

Die zeitliche Entwicklung möglicher Entfestigungen und Verweichungen wird in Begleitserien an Zylindern $d = 8$ cm für Druckfestigkeit, Spannung-Dehnungslinie und Spaltzugfestigkeit ermittelt.

Die Probekörper für die Kriechuntersuchungen können im Versuch Feuchte aufnehmen oder abgeben. Deshalb wird die Feuchte kontrolliert. Zu diesem Zweck werden Hohlzylinder aus Beton $d = 15$ cm, $h = 60$ cm in ca. 5 cm dicke Scheiben zersägt und mit einer zentralen Zugstange in derselben Lage wieder zusammenge-spannt. Zwischen die einzelnen Scheiben werden 2 mm dicke PVC-Folien gelegt. So sind ein Feuchteaustausch der Scheiben untereinander und die Trocknung an den Schnittflächen zuverlässig unterbunden. Im Verlauf der Kriechversuche wird durch Wägung und Trocknung von Scheiben die Betonfeuchte u_m wie folgt ermittelt:

$$u_m = \frac{\text{Gewicht der Scheibe} - \text{Gewicht nach Trocknung bei } 105^\circ\text{C}}{\text{Gewicht nach Trocknung bei } 105^\circ\text{C}} \cdot 100 \text{ /M.-\%}$$

Änderungen der Porenstruktur können an miteingelagerten Mörtelproben festgestellt werden. Dazu können Mörtelscheiben in den Kriechstand zusätzlich zu den Kriechkörpern eingebaut werden. So sind lastabhängige Langzeitänderungen der Porenstruktur festzustellen.

2.3 Betonzusammensetzungen

Nach den Ergebnissen des Literaturberichts erscheint es sinnvoll, Variationen in der Betonzusammensetzung zunächst auf die Zuschlagart zu begrenzen. Untersucht werden soll vorrangig Beton mit üblichem Quarzkieszuschlag, darüber hinaus Kalksteinzuschlag, auch bei Zusatz von Flugasche.

Im vergangenen Förderjahr wurde Quarzkies-Beton folgender Zusammensetzung verwendet:

Zement: PZ 35 F

Zuschlag: Quarzkies, Größtkorn 16 mm, (Sieblinie s. Bild 11) aus Vienenburg/Harz

Zusammensetzung: $Z = 350 \text{ kg/m}^3$

$G = 1840 \text{ kg/m}^3$

$W = 189 \text{ l/m}^3$

Mischungsverhältnis: 1 : 5,3 : 0,54

Frischbetondaten: Rohdichte: $2,38 \text{ kg/cm}^3$

Ausbreitmaß: $a = 36 \text{ cm}$

Verdichtungsmaß: $v = 1,12$

LP-Gehalt: 2,2 Vol.-%

Verdichtung: Rütteltisch 60 sek, bzw.
90 sek für Hohlzylinder

Die Grunddaten der Mischung sollen im folgenden weitgehend unverändert bleiben.

Die erste Mischung mit Kalksteinzuschlag wurde bereits hergestellt und befindet sich in der Vorlagerung. Als Kalksteinzuschlag wird Grubenkies aus Rostorf bei Göttingen verwendet, dessen Kornform der des Quarzkieszuschlags ähnelt. Der Kalkgehalt liegt bei 80 %.

Begleituntersuchungen zur Porositätsbestimmung werden an Mörtel folgender Zusammensetzung durchgeführt:

Zement: PZ 35 F 610 kg/m^3

Zuschlag: Normsand DIN 1164, Größtkorn 2 mm, 1830 kg/m^3

Wasser: 305 l/m^3

Mischungsverhältnis: 1 : 3,0 : 0,5

2.4 Herstellung und Lagerung der Probekörper

Für die Kriechversuche werden Hohlzylinder $d_a = 15 \text{ cm}$, $d_i = 5 \text{ cm}$, $h = 60 \text{ cm}$ verwendet. Als verlorene Innenschalung dienen PVC-Rohre. Eine Zylinderschalung ist auf Bild 2 abgebildet. Während der 90-tägigen Vorlagerung bleiben die Zylinder in der PVC-Schalung, so daß Feuchteabgabe zuverlässig verhindert ist. Die Stirnflächen werden versiegelt. Erst im Anschluß an die 90-tägige Vorlagerungszeit werden die Rohre aufgetrennt. Vor dem Einbau in die Kriechapparatur werden die Stirnflächen plangeschliffen. Das innere PVC-Rohr bleibt im Körper. Feuchteabgabe kann also nur über die äußere Mantelfläche stattfinden. Die Beteiligung des inneren PVC-Rohres an der Kraftaufnahme ist wegen des geringen E-Moduls, der bei Erwärmung zudem abnimmt, vernachlässigbar gering.

Begleituntersuchungen zur Ermittlung von Druckfestigkeit, Spannungs-Dehnungslinie und Spaltzugfestigkeit werden an Zylindern $d = 8 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$ durchgeführt. Die Probekörper werden in Stahlschalungen hergestellt. Nach dem Ausschalen werden die Proben für eine Vorlagerungszeit von 90 d in Alu-Folie und PVC-Folie versiegelt. Nach 90 d werden sie durch Sägen und Schleifen in Abschnitte gemäß Bild 12 zerlegt.

Im Anschluß an die 90-tägige Vorlagerung im versiegelten Zustand werden die Probekörper entsiegelt. Dann erfolgt die Lagerung bis zum Versuchsbeginn im Betonalter von mindestens 150 d. Dafür werden die Lagerungen 20/65 und 20/94 gewählt. Die Lagerung 20/65 erfolgt in einem klimatisierten Raum, die Lagerung 20/94 in geschlossenen Behältern über einer gesättigten Lösung von KNO_3 .

3. Kriechversuchsstände

3.1 Bau von Versuchsständen

Zur Untersuchung des Betonkriechens waren Kriechversuchsstände zu

entwickeln, herzustellen und zu erproben. Die geregelte Klimatisierung von Probekörpern ist nur in Klimakammern möglich. Eine Klimakammer, deren Prüfraum mit der Klimatisierungsanlage über flexible Schläuche verbunden ist, stand dem Institut bereits bei Beginn des Forschungsvorhabens zur Verfügung. In Boden und Decke dieses Prüfraumes befinden sich je zwei Durchführungen $d = 150$ mm, in die Druckstößel zur Belastung eingelassen werden können.

Die Klimatisierungseinrichtung wurde den Erfordernissen dieses Vorhabens angepaßt. Bild 13 zeigt das Funktionsprinzip der Einrichtung. Die Beheizung des Prüfraumes erfolgt mit einer sog. indirekten Soletemperierung über einen Wärmetauscher im Prüfraum. Beliebige relative Luftfeuchtigkeiten im Prüfraum werden mittels eines Wasserbades eingestellt, das auf die Taupunkttemperatur der gewünschten relativen Luftfeuchtigkeit temperiert wird. Durch dieses Taupunktbad perlt Luft, die dort gesättigt wird und anschließend in den Prüfraum gelangt. Dort wird sie aufgeheizt, wodurch sich die gewünschte Feuchtigkeit einstellt. Mittels eines digitalen Zeitprogrammgebers können die im Abschnitt 2.1 erläuterten Klimageschichten erzeugt werden.

Die über Druckstößel eingeleitete Druckkraft muß außerhalb des Prüfraumes aufgenommen werden. Üblicherweise geschieht dies über einen Rahmen. Dieses Verfahren wurde hier verworfen, weil ein ausladender Prüfraum erforderlich gewesen wäre, dessen Herstellung zur Erlangung genügender Steifigkeit und mittiger Krafteinleitung sehr aufwendig gewesen wäre. Stattdessen werden die Probekörper und Druckstößel als Hohlzylinder gefertigt, so daß die Kraft durch eine zentrale Zugstange aufgenommen werden kann. Bild 14 zeigt einen Vertikalschnitt durch eine Prüfsäule.

Die Verwendung von Hohlzylindern ($h = 60$ cm) bietet für dieses Vorhaben Vorteile. Da die Wanddicke 5 cm beträgt, können noch Betone üblicher Zusammensetzung mit einem Größtkorndurchmesser von 16 mm verwendet werden. Die Wanddicke ist gering genug, um

das Verformungsverhalten "feingliedriger Bauteile in instationärem Umgebungsklima" zu untersuchen. Die Höhe von 60 cm gestattet Verformungsmessungen über eine ausreichend lange Meßbasis von 300 mm, ohne in die querdehnungsbehinderten Einleitungsbereiche zu gelangen.

Die Belastung sollte hydraulisch erfolgen. Bild 3 zeigt den 1000-kN-Hohlkolben auf der Prüfsäule. Diese Forderung wurde von Beginn an gestellt, um auch nachträglich im Kriechversuch Lastkorrekturen oder auch Be- und Entlastungen vornehmen zu können. Infolge dieser Forderung stellten sich aber Probleme hinsichtlich der Lastkonstanthaltung. Die Lastkonstanthaltung hydraulisch zu realisieren, wurde verworfen, weil für jeden Probekörper ein Zylinder erforderlich gewesen wäre und darüber hinaus ein permanent angeschlossenes Pumpenaggregat mit aufwendigem Regelsystem. Dies hätte hohe zusätzliche Kosten verursacht. Auch ein pneumatisches System erfordert hohe Kosten durch Druckspeicher und einen Zylinder pro Probekörper.

Bei der Verwendung von Hohlzylindern mit Zugstange bieten sich Tellerfedern an. Sie sind vergleichsweise billig und zeigen bei Erwärmung im hier benötigten Temperaturbereich einen nur vernachlässigbaren Abfall der Federkraft. Bei ausreichend großem Federweg, hier ca. 3 cm durch Verwendung einer Federsäule mit 10 Einzelfedern, ist der Kraftverlust durch Kriechen und Schwinden gering (vergl. Abschnitt 3.3). Temperaturänderungen des Kriechkörpers wirken sich an den Tellerfedern nicht aus, weil auch die innenliegende Zugstange erwärmt oder abgekühlt wird und über einen ähnlichen Temperaturdehnkoeffizienten verfügt wie Beton. Bild 4 zeigt das Federpaket in einem Prüfstand.

Die Prüfstände sind für Kräfte bis 500 kN ausgelegt und mit der derzeitigen Tellerfederbestückung bis 300 kN ausnutzbar. Alle in der Prüfkammer befindlichen Stahlteile des Prüfstandes wurden aus Cr-Ni-Stahl gefertigt, die übrigen aus Baustahl St 37.

In der vergangenen Förderperiode wurde, unterstützt durch Mittel der DFG, ein weiterer baugleicher Kriechprüfstand für erhöhte Temperatur errichtet und erprobt. Er kann in der folgenden Periode für Reihenuntersuchungen eingesetzt werden. Somit kann nun das Kriechen von 4 Probekörpern bei erhöhter Temperatur untersucht werden.

3.2 Wegmeßsystem

Die Verformungen müssen im Prüfraum gemessen werden. Somit ist das Meßsystem zum einen Temperaturänderungen unterworfen und muß andererseits dem einwirkenden Klima langzeitstabil widerstehen können. Die bei Kriechversuchen häufig verwendete, kostengünstige Verformungsmessung mit einem mechanischen oder auch induktiven Setzdehnungsmesser ist ungeeignet, weil durch Öffnen des Prüfraumes häufige Klimastörungen entstünden. Außerdem versagen Setzdehnungsmesser dort, wo bei Be- oder Entlastung oder Temperaturänderung eine erhöhte Abfragefrequenz gewünscht wird. Dehnmeßstreifen (DMS) sind hier gleichfalls ungeeignet, da sie eine für Langzeitmessungen ungenügende Nullpunktstabilität aufweisen.

Deshalb wurden induktive Wegaufnehmer gewählt. Sie sind temperaturunabhängig und temperaturwechselbeständig. Die gewählten induktiven Wegaufnehmer haben einen Nennweg $s = \pm 1 \text{ mm}$ und einen losen Tauchanker. Es handelt sich um speziell vor Feuchtigkeit geschützte Aufnehmer der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik. Zu Beginn der Reihenuntersuchungen in der vergangenen Förderperiode traten Störungen an den Wegaufnehmern auf, die weitere Verformungsmessungen unmöglich machten. Es zeigte sich, daß die Kabelisolierung der Zuleitungen versprödet war und Risse aufwies. Die Fa. HBM hatte fälschlicherweise PVC-Isolierungen benutzt. Die Reklamation und Reparatur führte zu einer dreimonatigen Versuchsunterbrechung.

Die Wegaufnehmer, je Probekörper drei auf den Umfang verteilt, werden auf Meßblöcke montiert, die eine gehärtete Schneide besitzen und von umlaufenden Aluminium-Spannrings an den Probekörper gepreßt werden. Bild 15 zeigt schematisch einen Längsschnitt. Zur Überbrückung der Meßbasis von 300 mm dienen Stäbe aus Invarstahl. Die gehärteten Schneiden an den Meßblöcken garantieren eine exakt definierte Länge der Meßbasis und sichern das Meßsystem auf dem Probekörper gegen Verschiebungen. Bild 5 zeigt einen Aluminium-Spannring mit Meßblöcken und Bild 6 einen Probekörper im Prüfraum mit montiertem Meßsystem.

Zur Anpassung, Verstärkung und Ausgabe der Meßwerte dient eine Meßwerterfassungs- und Umschaltanlage, die von der DFG für die Dauer des Vorhabens zur Verfügung gestellt wurde.

3.3 Erprobung, Vorversuche

In Erprobungs- und Vorversuchen wurden die Temperaturdehnung des Meßsystems, die Verzögerung bei der Aufheizung von Betonproben gegenüber der geregelten Prüfraumtemperatur und die Höhe von Reibungsverlusten in den Tellerfedern ermittelt.

Zur Ermittlung der Dehnung des Meßsystems bei Temperaturänderung wurde ein Eichversuch auf einem Stahlhohlzylinder $d = 150$ mm durchgeführt. Der Temperaturdehnkoeffizient des Stahles war zuvor zu $12,14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ermittelt worden. Anschließend wurde der Stahlzylinder mit montiertem Meßsystem aufgeheizt und wieder abgekühlt. Dabei ergab sich der in Bild 16 dargestellte Dehnungsverlauf über der Temperatur. Der gemessene Dehnkoeffizient $\alpha_T = 9,64 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ entspricht der Differenz der Temperaturdehnung von Stahlzylinder und Meßsystem. Unter der Annahme einer linearen Temperaturdehnung des Stahlzylinders ergibt sich, daß das Meßsystem nur eine geringe, lineare und hysteresefreie Temperaturdehnung aufweist:

$$\alpha_{T, \text{ Meßsystem}} = 12,14 \cdot 10^{-6} - 9,64 \cdot 10^{-6} = 2,50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

Dieser α_T -Wert wird in den Versuchsreihen zur Korrektur der gemessenen Temperaturdehnungen berücksichtigt.

Die Klimatisierungseinrichtung kann den Prüfraum mit konstanter Geschwindigkeit $\dot{T} = \text{const}$ aufheizen. Die Regelung erfolgt über einen Temperaturfühler Pt 100 im Prüfraum. Die Temperatur des Probekörpers im Prüfraum folgt zeitlich verzögert in Abhängigkeit der Aufheizgeschwindigkeit und der Probenabmessungen. Für die Aufheizgeschwindigkeit $\dot{T} = 5 \text{ }^\circ\text{C/h}$ und für einen Betonhohlzylinder, Wanddicke $d = 5 \text{ cm}$, wurden in einem Vorversuch die Aufheizverzögerung und der Temperaturgradient ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 17 dargestellt. Ausgenommen von Ein- und Ausschwenkzeiten folgt der Probekörper der Aufheizgeschwindigkeit des Prüfraums. Der maximale Temperaturgradient über die Wanddicke beträgt etwa $3 \text{ }^\circ\text{C}$, im Hinblick auf Temperatureigenspannungen vernachlässigbar.

Reibungsverluste im Tellerfederpaket können, wenn die Kontrolle der Belastung mit Hilfe des Federweges vorgenommen wird, zu Fehleinschätzungen der tatsächlichen Druckkraft führen. Deshalb erfolgt in allen Belastungsvorgängen eine Kontrolle über eine Ringkraftmeßdose im Versuchsstand. Die Zusammendrückung des Federpakets wird mit montierten Meßuhren gemessen. Bild 18 zeigt die gute Übereinstimmung zwischen der Federkennlinie nach Herstellerangaben und den gemessenen Werten in einem Belastungsvorgang.

Durch Kriechen und Schwinden wird das Federpaket zunehmend entspannt. Deshalb sollte der Federweg durch Meßuhren kontrolliert werden, um gegebenenfalls nachspannen zu können. In Erprobungskriechversuchen hat sich gezeigt, daß bei Belastungsdauern von etwa 100 Tagen eine Entspannung der Federn um maximal $0,3 \div 0,5 \text{ mm}$ zu erwarten ist. Das entspricht einem Kraftverlust von $1,1 \div 1,8 \text{ \%}$. Die Kriechlast kann also mit hinreichender Genauigkeit während der Belastungsdauer als konstant angenommen werden. Sollte ein größerer Kraftverlust auftreten, kann durch Nachspannen korrigiert werden.

4. Erste Versuchsergebnisse

4.1 Kriechen

Bis zum Berichtsdatum (Februar 1984) wurden die stationären Kriechversuche 90/65 stat und 90/94 stat einschl. der Begleituntersuchungen, sowie der Kriechversuch 90/94 instat/Zyk durchgeführt (vgl. Abschn. 2.1). Zu letzterem sind die Begleitversuche noch nicht beendet.

Bild 19 zeigt in einer Übersichtsdarstellung exemplarisch die im Versuch 90/65 stat in Abhängigkeit der Zeit gemessenen Verformungen infolge Temperaturänderung, Schwinden und Kriechen. Die Belastung erfolgte 96 h nach Aufheizbeginn. Die Trocknung bis zum Belastungszeitpunkt und während der Belastungsdauer wurde registriert. Die Probekörper blieben etwa 35 d unter Last. Der Entlastung schloß sich eine ca. 20-tägige Beobachtung der verzögert-elastischen Rückdehnung an.

Bild 20 stellt die Kriechzahlen der bei erhöhter Temperatur und Normaltemperatur durchgeführten Versuche dar. Thermische Dehnungen und Schwinddehnungen wurden mit Hilfe der an lastfrei eingelagerten Proben gemessenen Verformungen eliminiert. Die Serien 90/94 und 20/94 mußten nach 400 h aufgrund der in Abschnitt 3.2 erläuterten Störungen am Meßsystem abgebrochen werden. Es ist erkennbar, daß die Klimabeanspruchungen 90/65 und 90/94 sowie 20/65 und 20/94 zu jeweils ähnlicher Kriechverformungsentwicklung führten. Nach 400-stündiger Belastung ist in beiden Serien die Kriechzahl bei Einwirkung erhöhter Temperatur ca. 2,5-fach so hoch wie bei Normaltemperatur.

Sehr deutlich wird in Bild 20 die hohe Kriechgeschwindigkeit, die während der ersten Aufheizung und der folgenden etwa 100 h in der Serie 90/94 instat/Zyk entsteht. Während der Aufheizung liegt eine Kriechgeschwindigkeit von etwa $4,5 \cdot 10^{-5}$ 1/h vor, während die

anfängliche Kriechgeschwindigkeit in der Serie 90/94 stat nur etwa $1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/h beträgt.

Nachfolgende Zyklen verursachen anscheinend keinen Zuwachs der Kriechverformungen, der wesentlich den bei stationärer Einwirkung des Klimas 90/94 auftretenden übertrifft. Die Gesamt-Kriechverformung nach 400-stündiger Lasteinwirkung ist beim instationären Klima höher. Das Verhältnis der Kriechzahl bei erhöhter Temperatur zu der bei Normaltemperatur ist zu diesem Zeitpunkt für stationäres Klima etwa 2,5, bei instationärem Klima hingegen ca. 3,2. Die detaillierte Auswertung der soeben beendeten Serie 90/94 instat/Zyk ist in Arbeit.

Bild 21 zeigt die seit dem Aufheizbeginn beobachteten Trocknung des Betons für die drei untersuchten Serien bei erhöhter Temperatur. Bis zum Erreichen annähernder Ausgleichsfeuchte benötigen die untersuchten Hohlzylinder bei 90 °C etwa 300 Stunden. Bei zyklischer Klimabeanspruchung zwischen 90/94 und 20/94 werden keine Ausgleichszustände erreicht. Die Probenfeuchte alterniert um eine mittlere Feuchte von etwa 3 M.-%, bezogen auf das Trockengewicht. Weitere Auswertungen der Feuchteverhältnisse folgen, ebenso die Auswertung zu den verzögert-elastischen Rückverformungen.

4.2 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten

Die Tabellen 1 und 2 zeigen die in den Begleituntersuchungen ermittelten Werte der Zylinderdruckfestigkeit, bestimmt an Zylindern $d = 8 \text{ cm/h} = 16 \text{ cm}$ sowie der Spaltzugfestigkeit, bestimmt an Zylindern $d = 8 \text{ cm/h} = 8 \text{ cm}$. Sie enthalten außerdem die an Hohlzylindern ermittelten Werte der Druckfestigkeit und der Restfestigkeit nach Kriechversuchen. Angegeben ist jeweils der Mittelwert von 3 - 5 Werten für die Druckfestigkeit und mindestens 5 Werten für die Spaltzugfestigkeit. Die Werte für die Hohlzylinder sind i.a. Einzelwerte. Die Prüfung erfolgte bei Raumtemperatur.

Lagerung	Betonalter	Zylinder 8/16 cm		Zyl. 8/8 cm	Hohlzylinder 15/60 cm	
	[d]	β_c [N/mm ²]	E [N/mm ²]	β_{sz} [N/mm ²]	β_c [N/mm ²]	E [N/mm ²]
Nach Vorlagerung bei 20/65	150	51,6	23.200	3,9	42,8	22.500
Weiterlagerung 20/65	200	50,8	23.500	4,3	45,4	23.900
90/65	160	43,6	20.500	3,2	33,7	20.600
	180	41,3	20.600	3,2		
	200	41,5	19.700	3,4		
Restwert nach Kriechen 20/65	210				44,8	24.800
Restwert nach Kriechen 90/65	210				37,4	22.600

Tabelle 1: Festigkeiten und E-Moduli für 90/65 stat

Lagerung	Betonalter	Zylinder 8/16 cm		Zyl. 8/8 cm	Hohlzylinder 15/60 cm	
	[d]	β_c [N/mm ²]	E [N/mm ²]	β_{sz} [N/mm ²]	β_c [N/mm ²]	E [N/mm ²]
Nach Vorlagerung bei 20/94	150	42,1	23.800	3,6	43,6	26.800
Weiterlagerung 20/94	230	41,5	26.900	3,4	44,8	27.200
90/94	170	36,9	21.300	3,0		
	190	35,1	18.000	3,2		
	230	34,2	17.400	3,9		
Restwert nach Kriechen 20/94	210				41,3	27.200
Restwert nach Kriechen 90/94	210				34,6	22.400

Tabelle 2: Festigkeiten und E-Moduli für 90/94 stat

Die in den Tabellen eingetragenen E-Moduli sind Sekantenmoduli, die zwischen dem Koordinatenursprung und dem Drittelpunkt der Druckfestigkeit bei der Aufzeichnung von Spannungs-Dehnungslinien ermittelt wurden. Zur Serie 90/94 instat/Zyk liegen die Ergebnisse der Begleituntersuchungen noch nicht vollständig vor.

Die Zylinderdruckfestigkeit fällt infolge Temperatureinwirkung auf ca. 80 % des Ausgangswertes ab. Dabei scheint die Dauer der Temperatureinwirkung nicht entscheidend zu sein.

Die Restdruckfestigkeit nach dem Kriechen bei erhöhter Temperatur, ermittelt bei Raumtemperatur, liegt etwa 10 % über der Festigkeit nach lastfreier Temperatureinwirkung. Für die Spaltzugfestigkeit ergeben sich etwa entsprechende Verluste wie für die Druckfestigkeit. Der E-Modul fällt infolge des Klimas 90/94 stärker ab als für 90/65. Der Restwert nach 60 d 90/94 beträgt ca. 70 %, für 90/65 etwa 85 %.

Die Bilder 22 und 23 zeigen einige Spannungs-Dehnungslinien für die Serien 90/65 stat und 90/94 stat. Auffällig ist insbesondere der deutliche Rückgang der Bruchdehnung, der an den Proben auftrat, die zuvor einem Kriechversuch bei 90/65 oder 90/94 unterworfen waren.

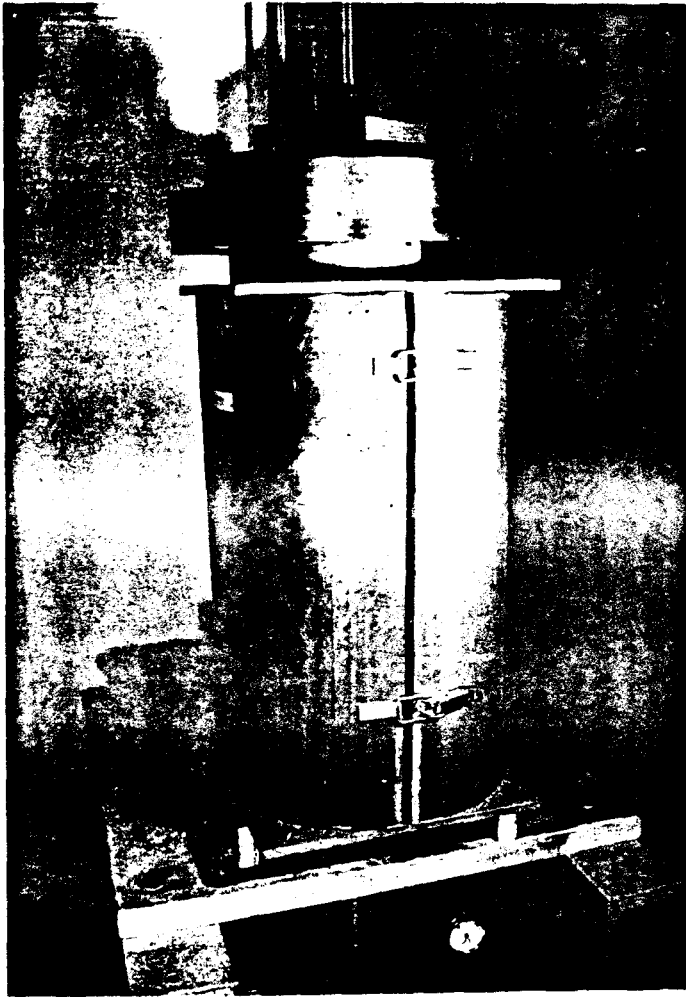


Bild 1

Kriechversuchsstand mit Salzlösungsbehälter für hohe Luftfeuchtigkeit bei 20 °C

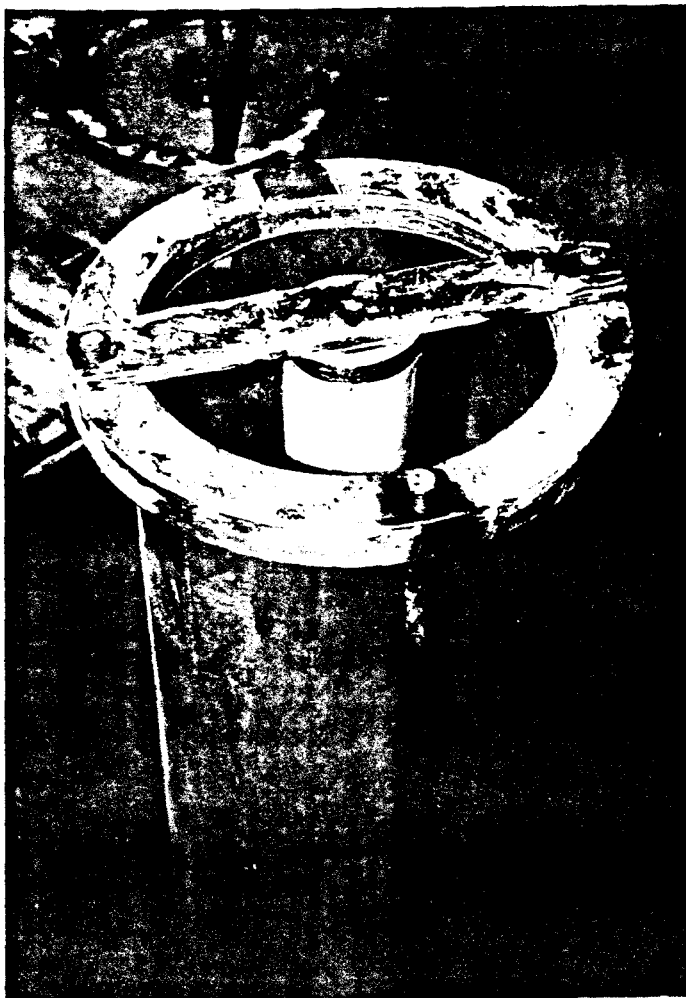


Bild 2

Schalung für Beton-Hohlzylinder ($d_a = 15 \text{ cm}$, $d_i = 5 \text{ cm}$)

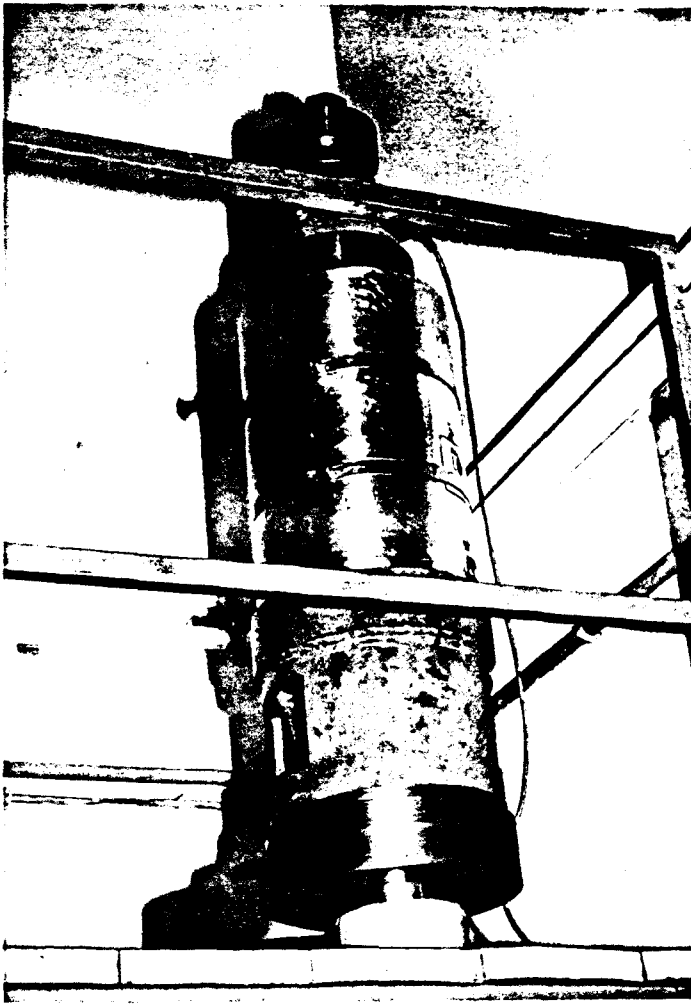


Bild 3

1000-kN-Hohlkolbenzylinder
auf der Prüfsäule

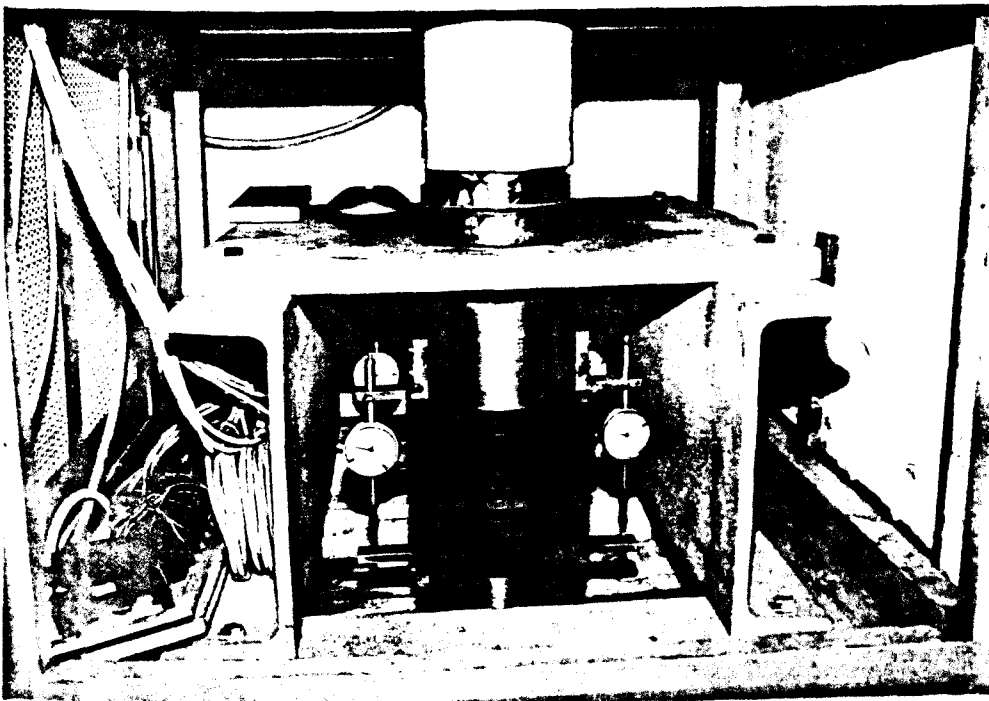


Bild 4

Tellerfederpaket in
einem Kriech-Versuchs-
stand

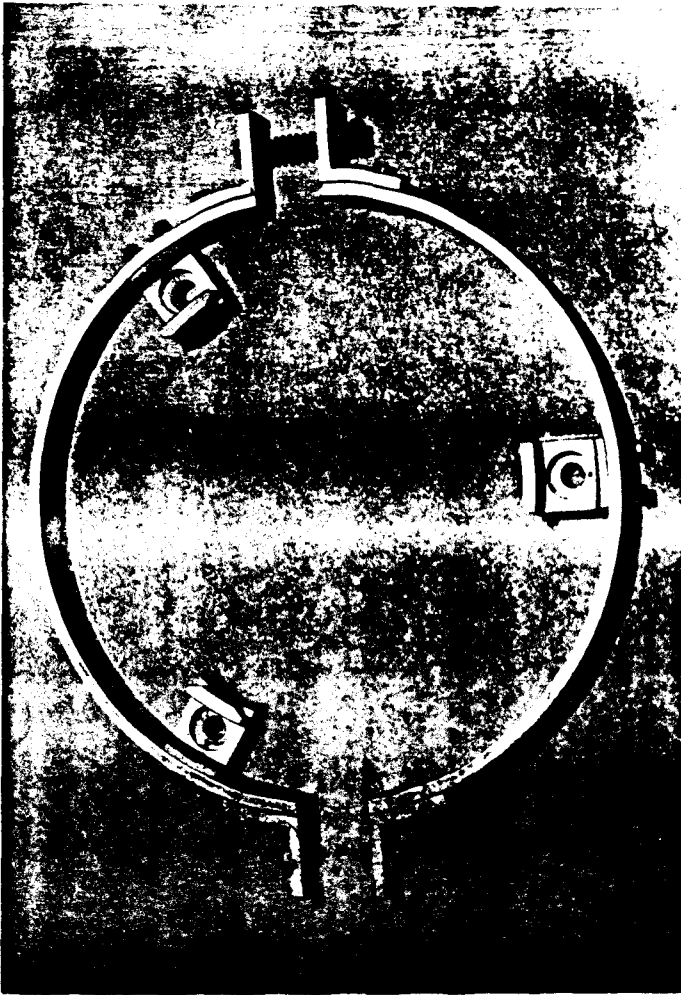


Bild 5

Aluminium-Spannring
mit Meßblöcken

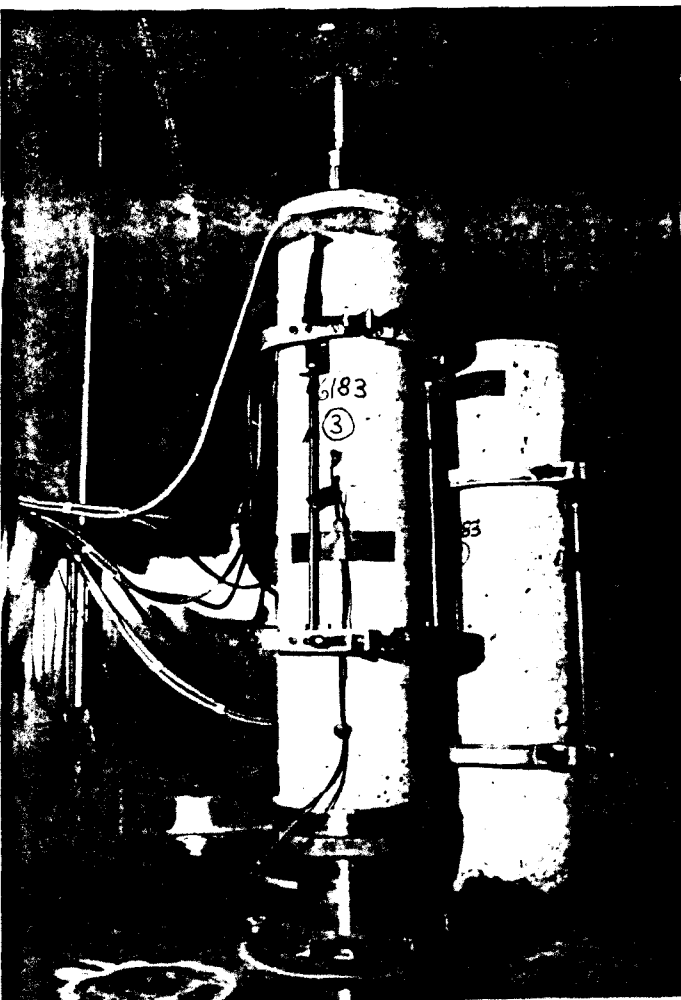


Bild 6

Kriech-Versuchskörper im Prüf-
raum mit montiertem Meßsystem

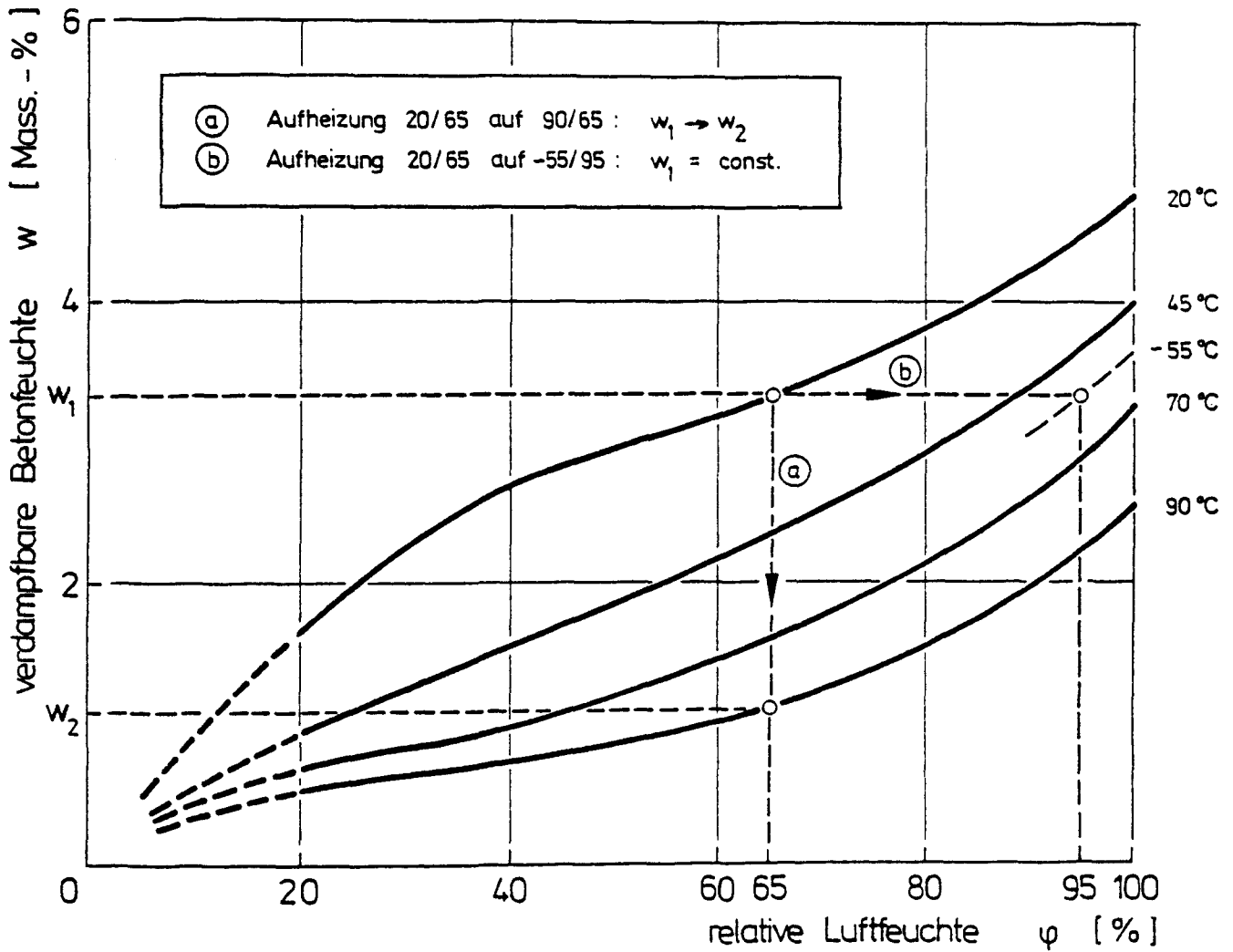


Bild 7 : Desorptionsisothermen von Quarzkies-Beton bei erhöhter Temperatur, nach Hundt

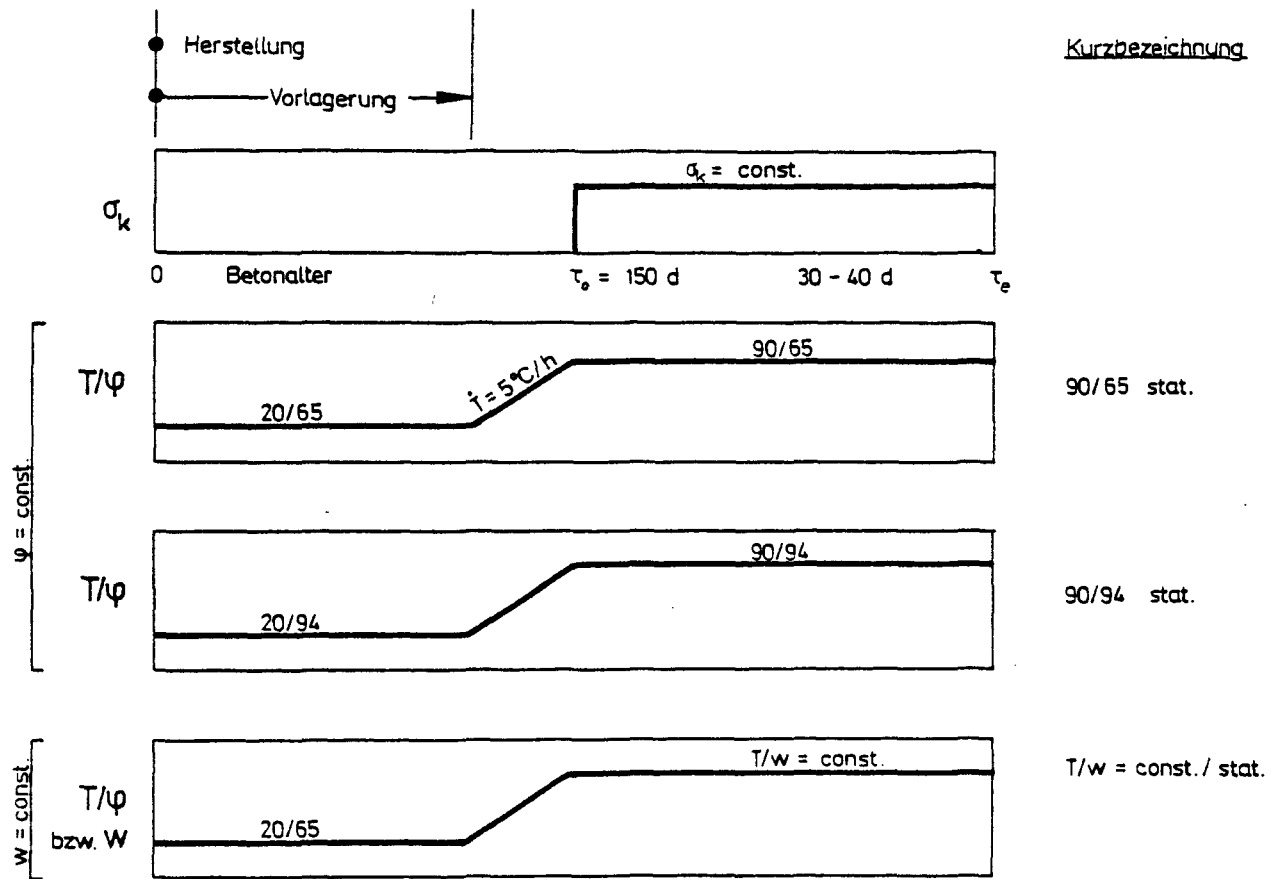


Bild 8 : Klimageschichten für Kriechversuche bei stationärer Temperatur

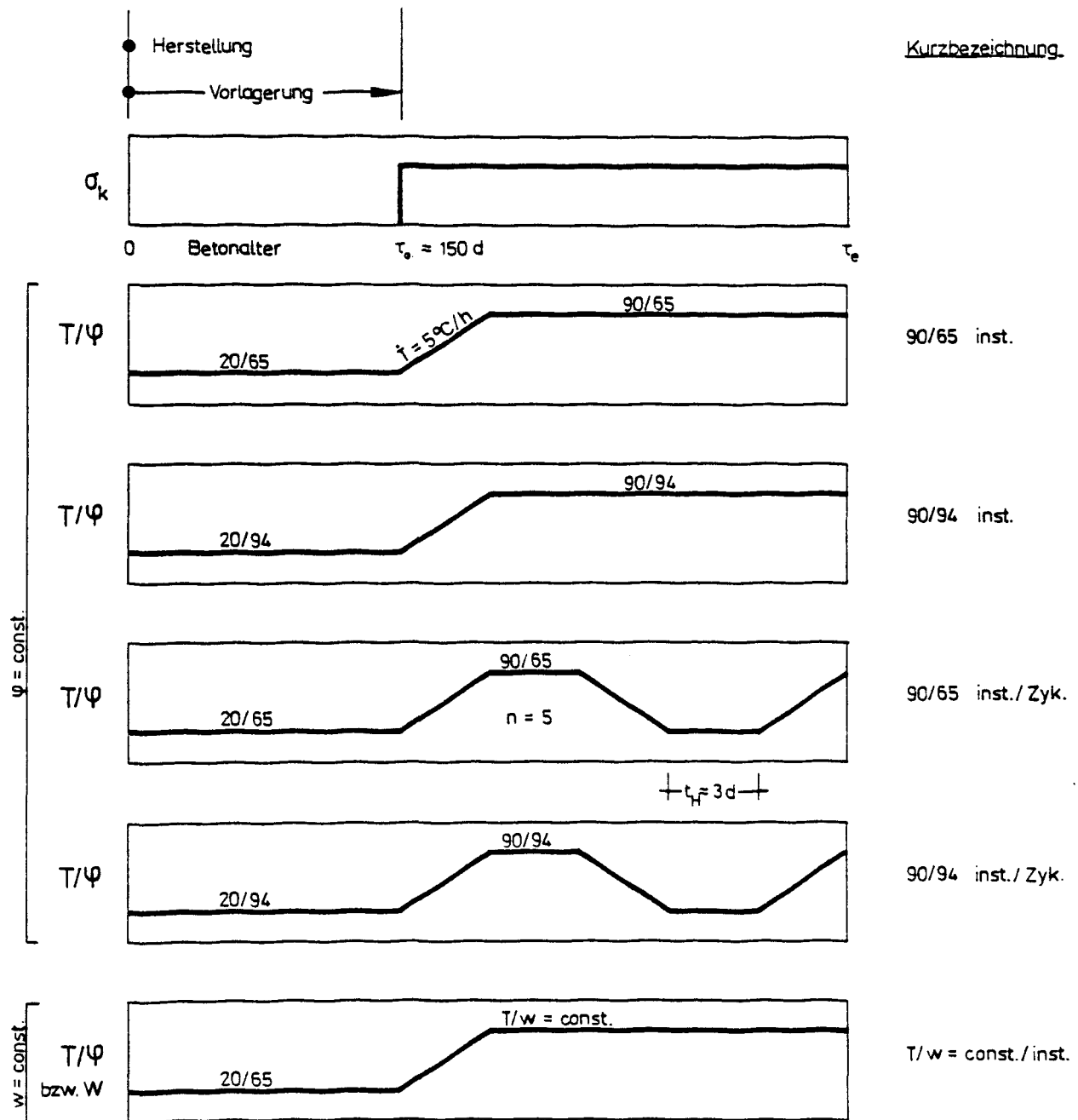


Bild 9 : Klimageschichten für Kriechversuche bei instationärer Temperatur

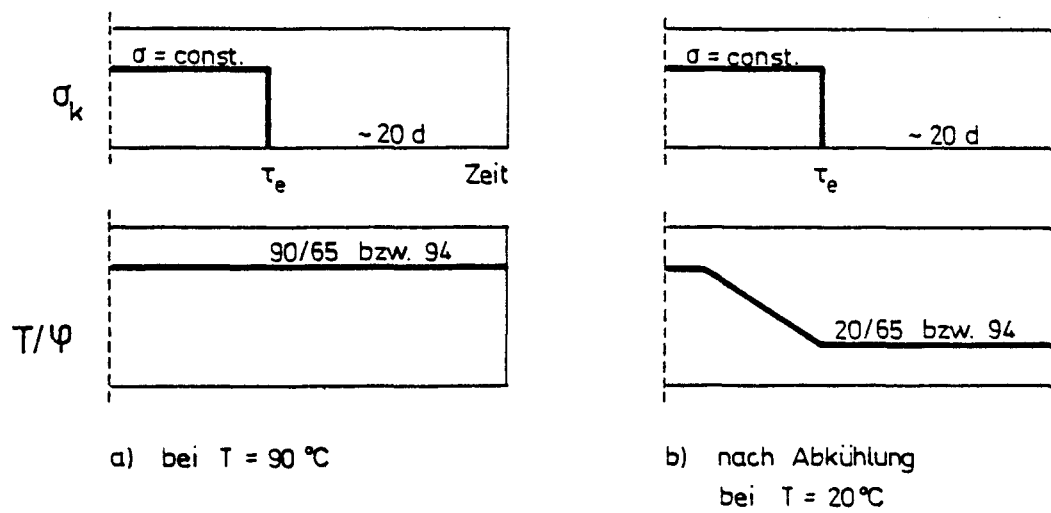


Bild 10 : Varianten zur Messung der verzögert-elastischen Rückverformung

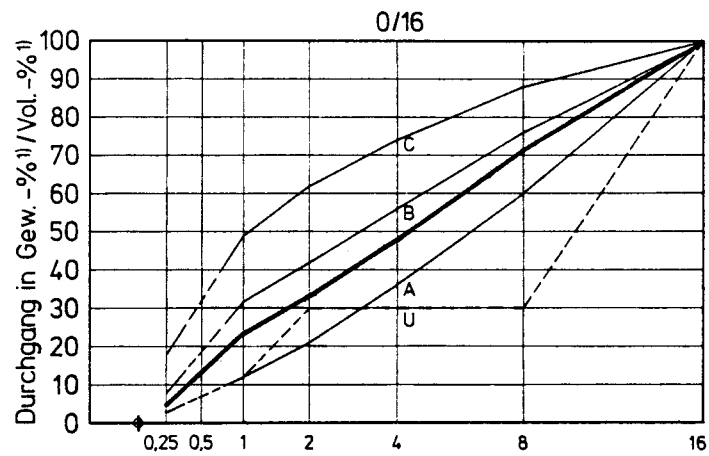


Bild 11 : Sieblinie des Quarzkies - Betons

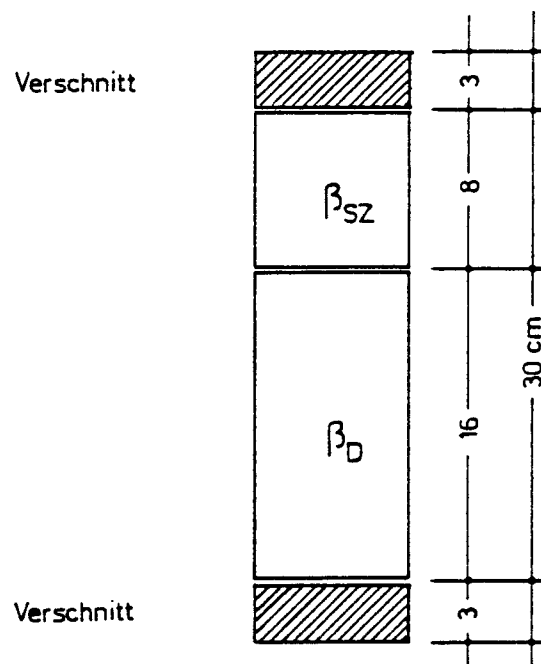
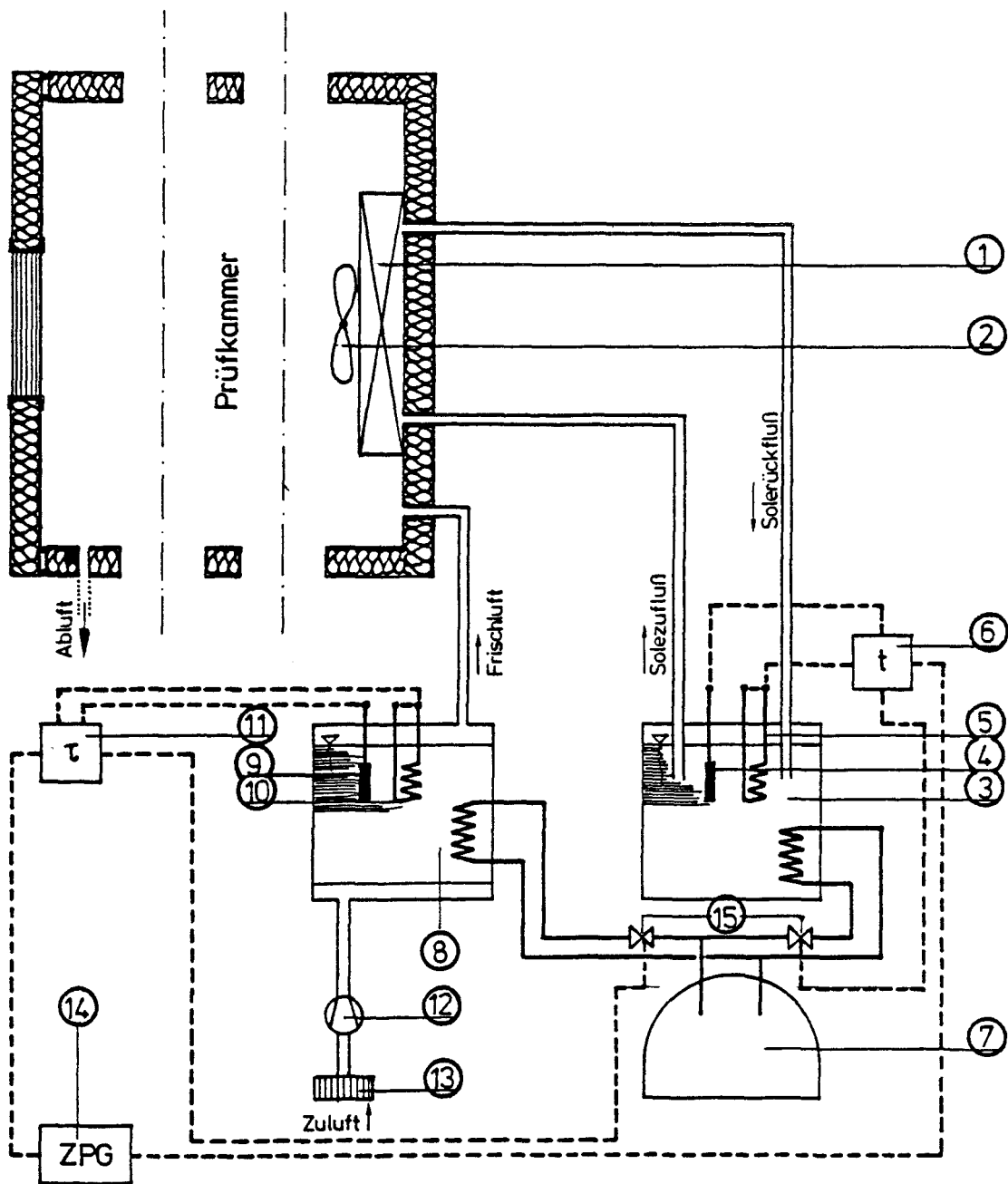


Bild 12 : Geometrie der Probekörper für Begleituntersuchungen



- | | | |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 Wärmetauscher | 6 Soletemperaturregler | 11 Taupunkttemperaturregler |
| 2 Ventilator | 7 Kälteaggregat | 12 Luftpumpe |
| 3 Solebad | 8 Taupunkt-Wasserbad | 13 Luftfilter |
| 4 Soletemperaturfühler | 9 Taupunkttemperaturfühler | 14 Zeit-Programmgeber |
| 5 Soleheizung | 10 Heizung | 15 Magnetventile |

Bild 13 : Prinzipskizze der Klimatisierungseinrichtung

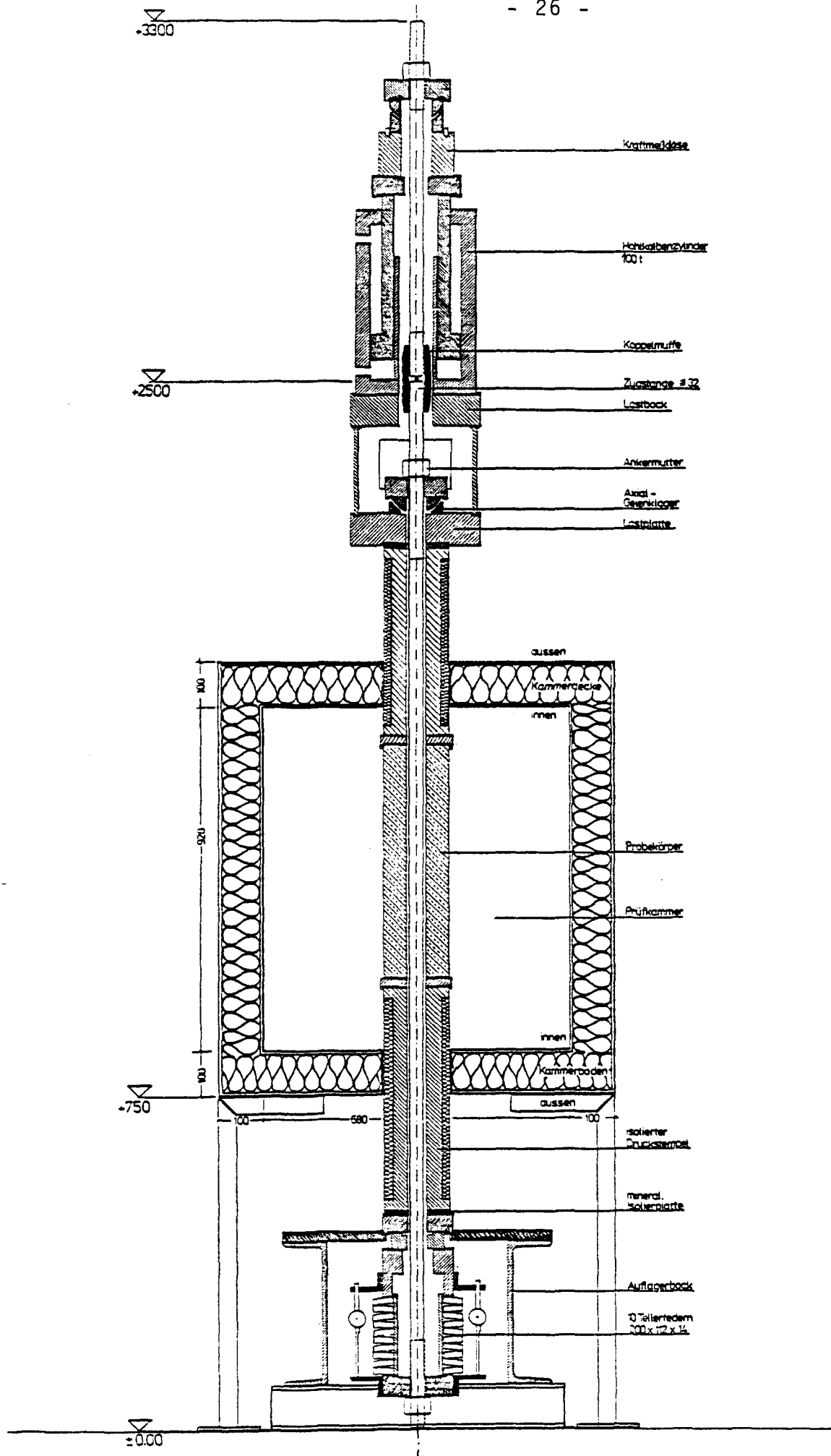


Bild 14 : Kriechprüfstand , Übersicht

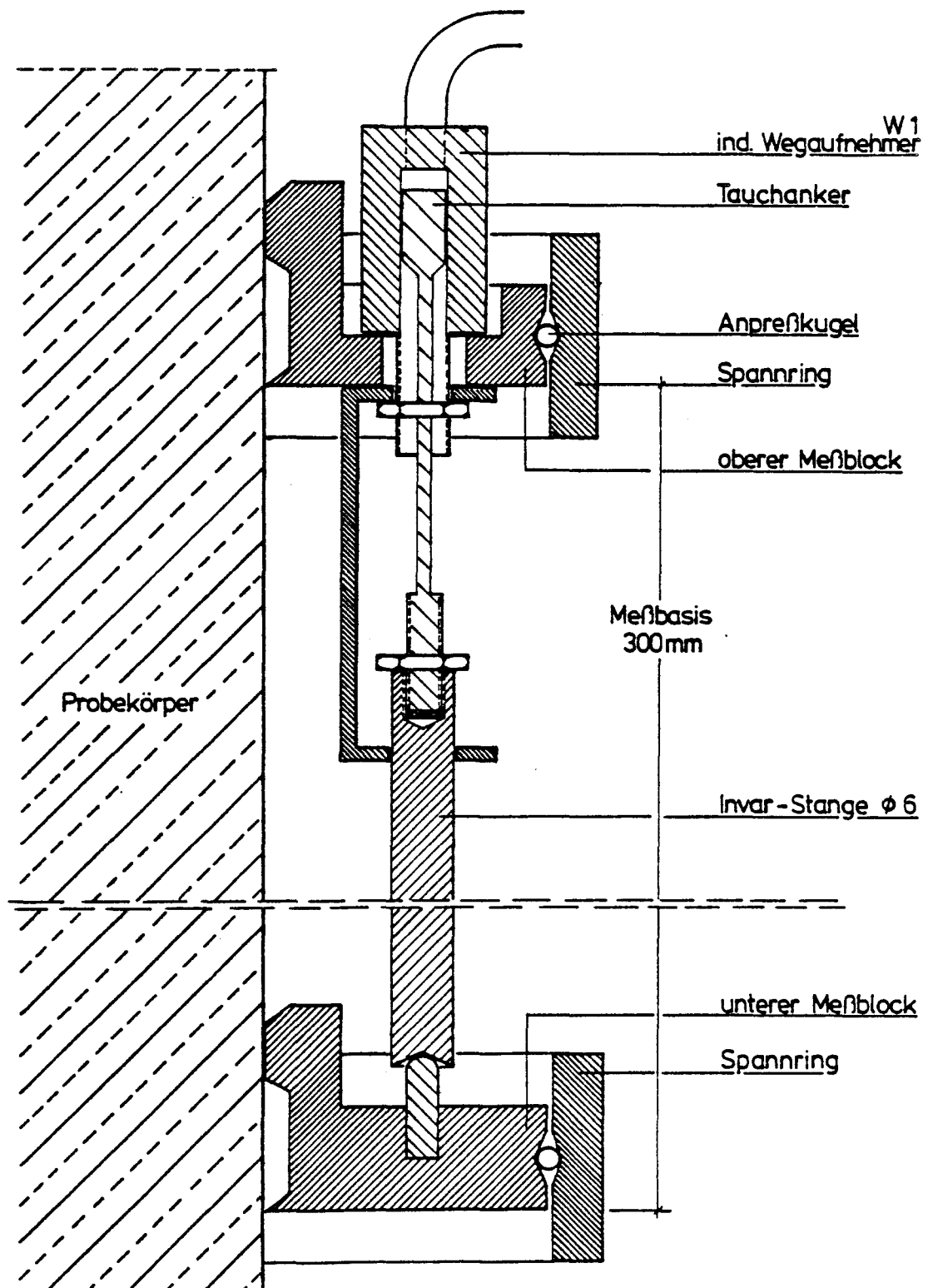


Bild 15 : Meßsystem, Längsschnitt

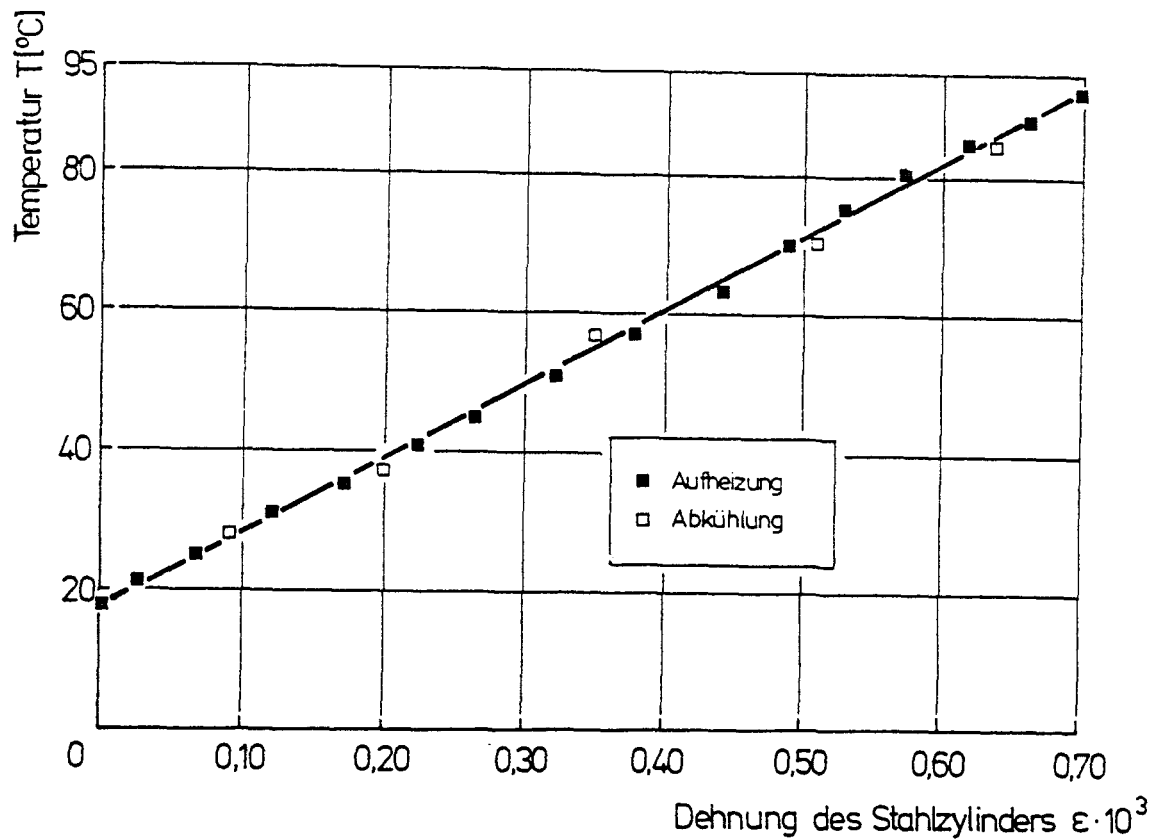


Bild 16 : Eichversuch zur Ermittlung der Temperaturdehnung des Weg - Meßsystems

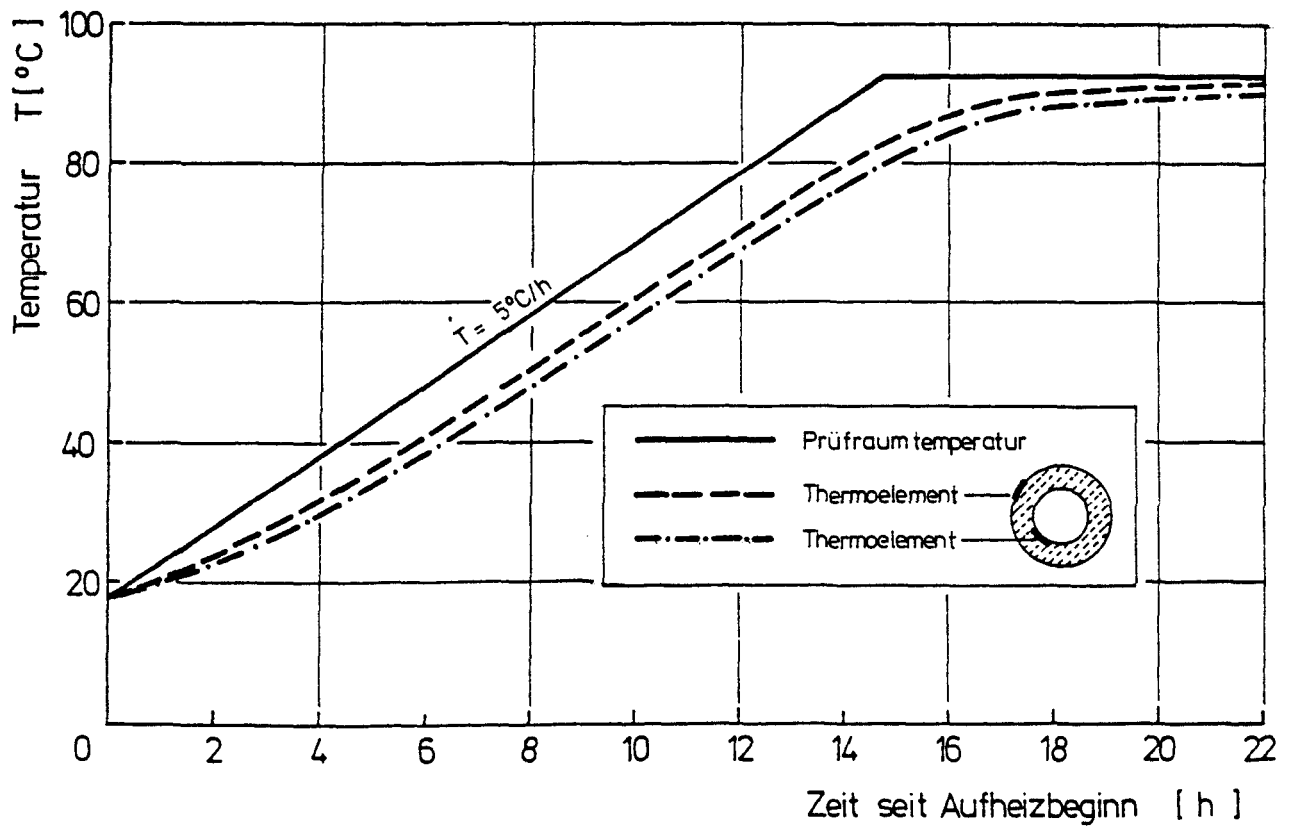


Bild 17 : Zeitlicher Aufheizverlauf an Betonhohlzylindern ($d_a = 15 \text{ cm}$, $d_i = 5 \text{ cm}$)

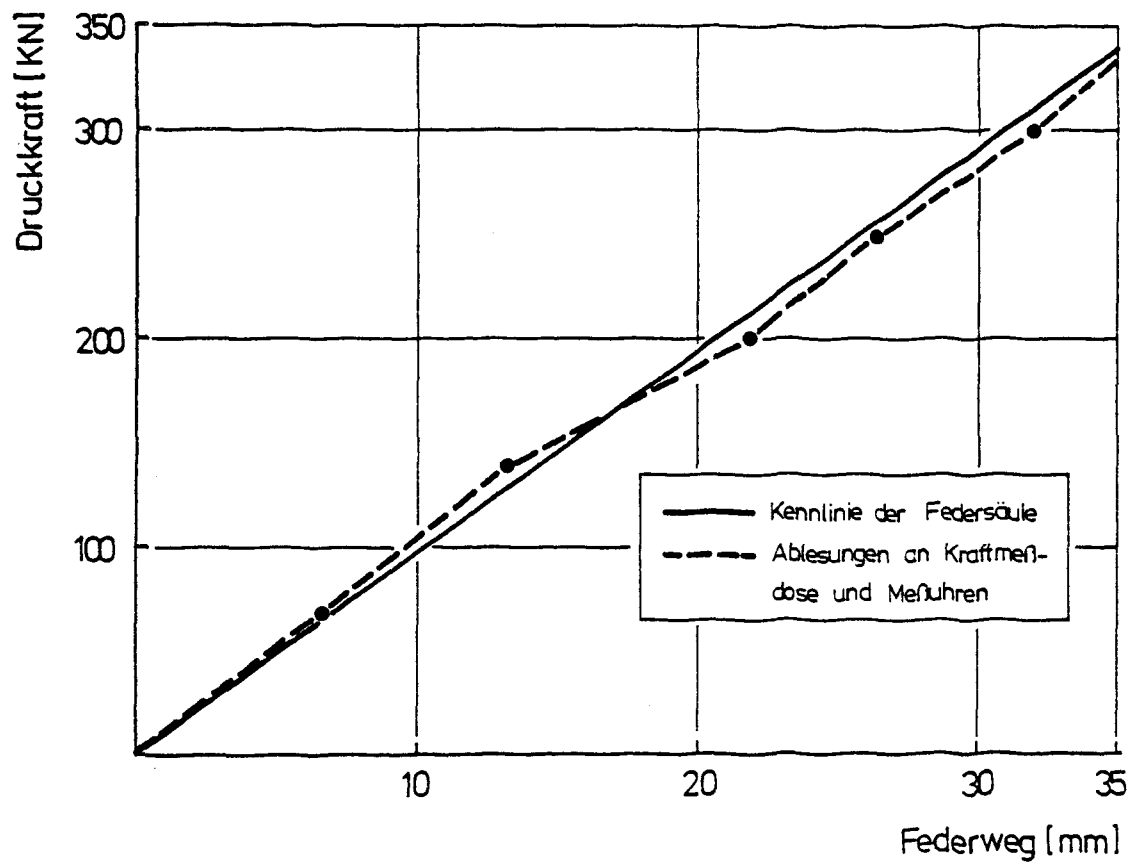


Bild 18 : Überprüfung der Federsäulen - Kennlinie

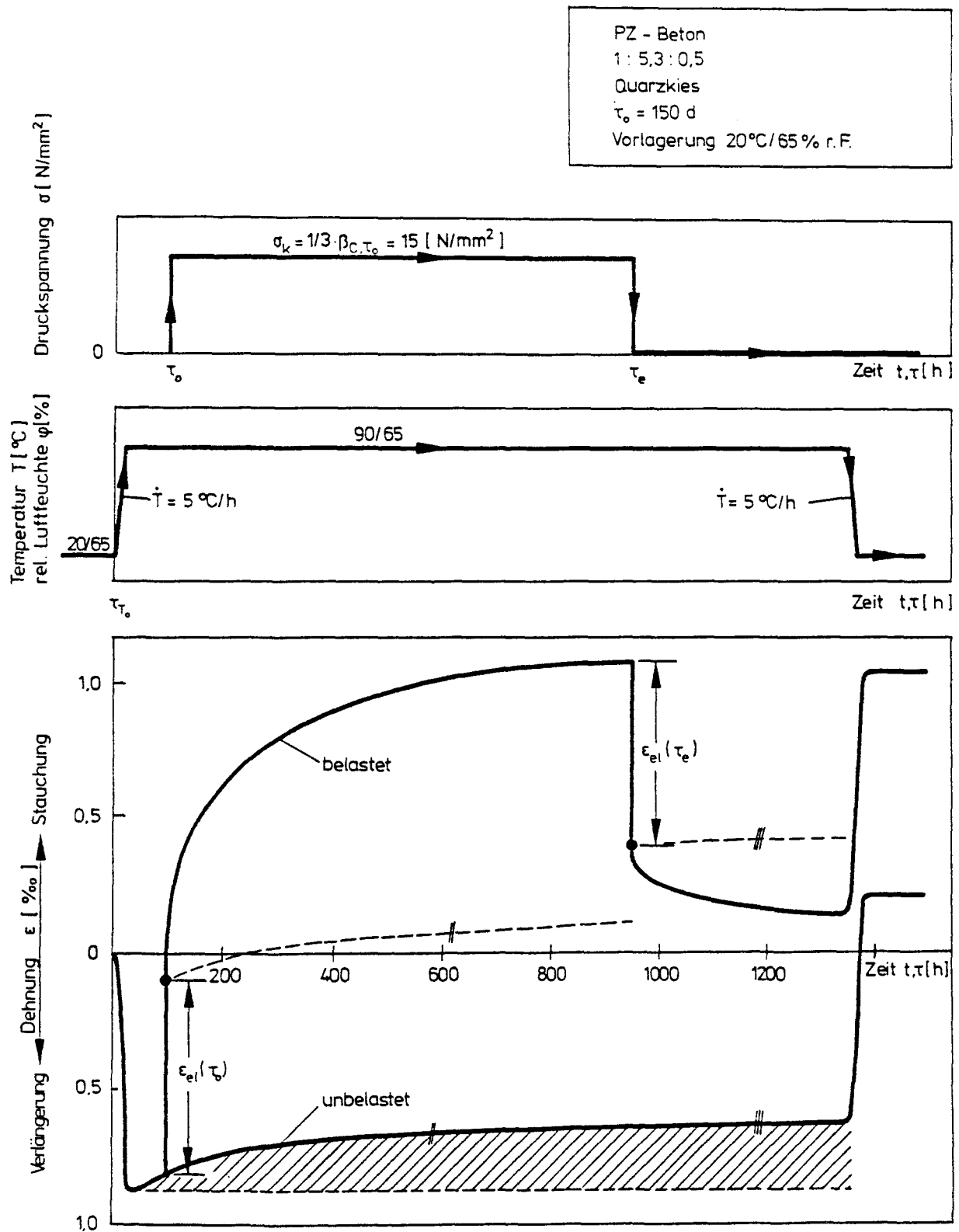


Bild 19 : Ablauf und Verformungen des Kriechversuchs 90/65 stat

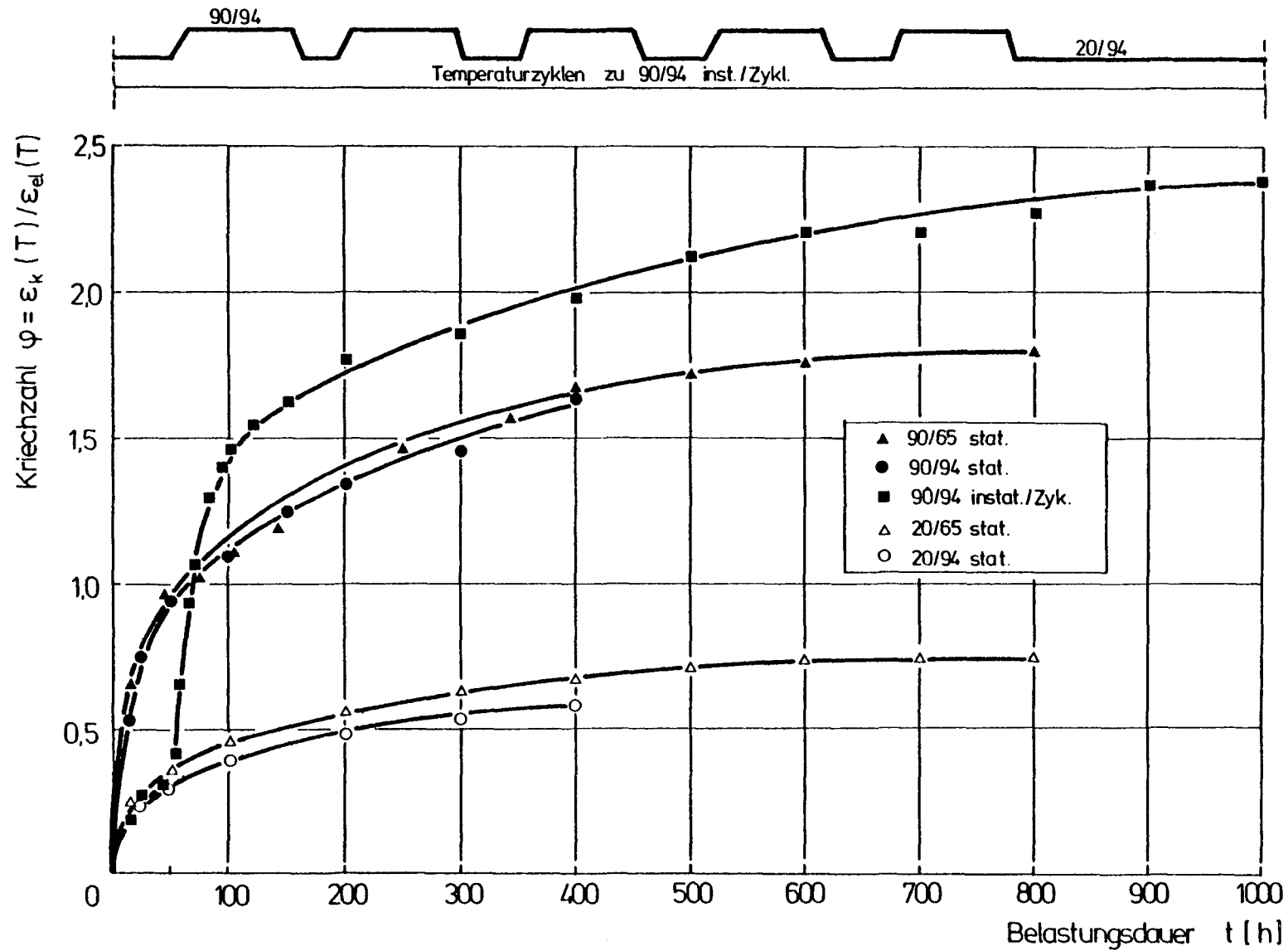


Bild 20 : Kriechzahl φ für die Kriechversuche 90/65 stat., 90/94 stat., 90/94 instat./Zykl.

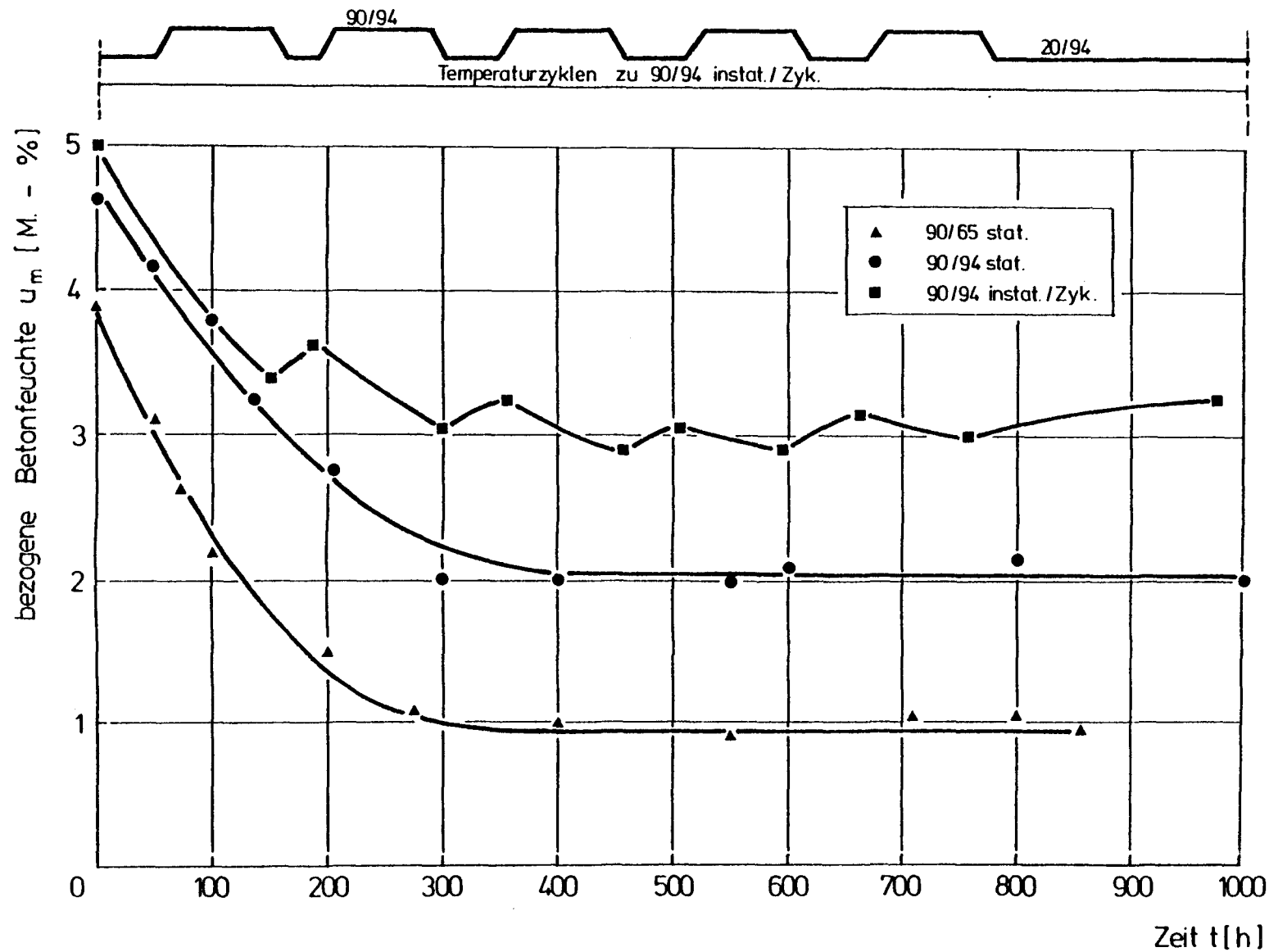


Bild 21 : Gewichtsverlust durch Trocknung während der Kriechversuche 90/65 stat., 90/94 stat., 90/94 instat./Zykl.

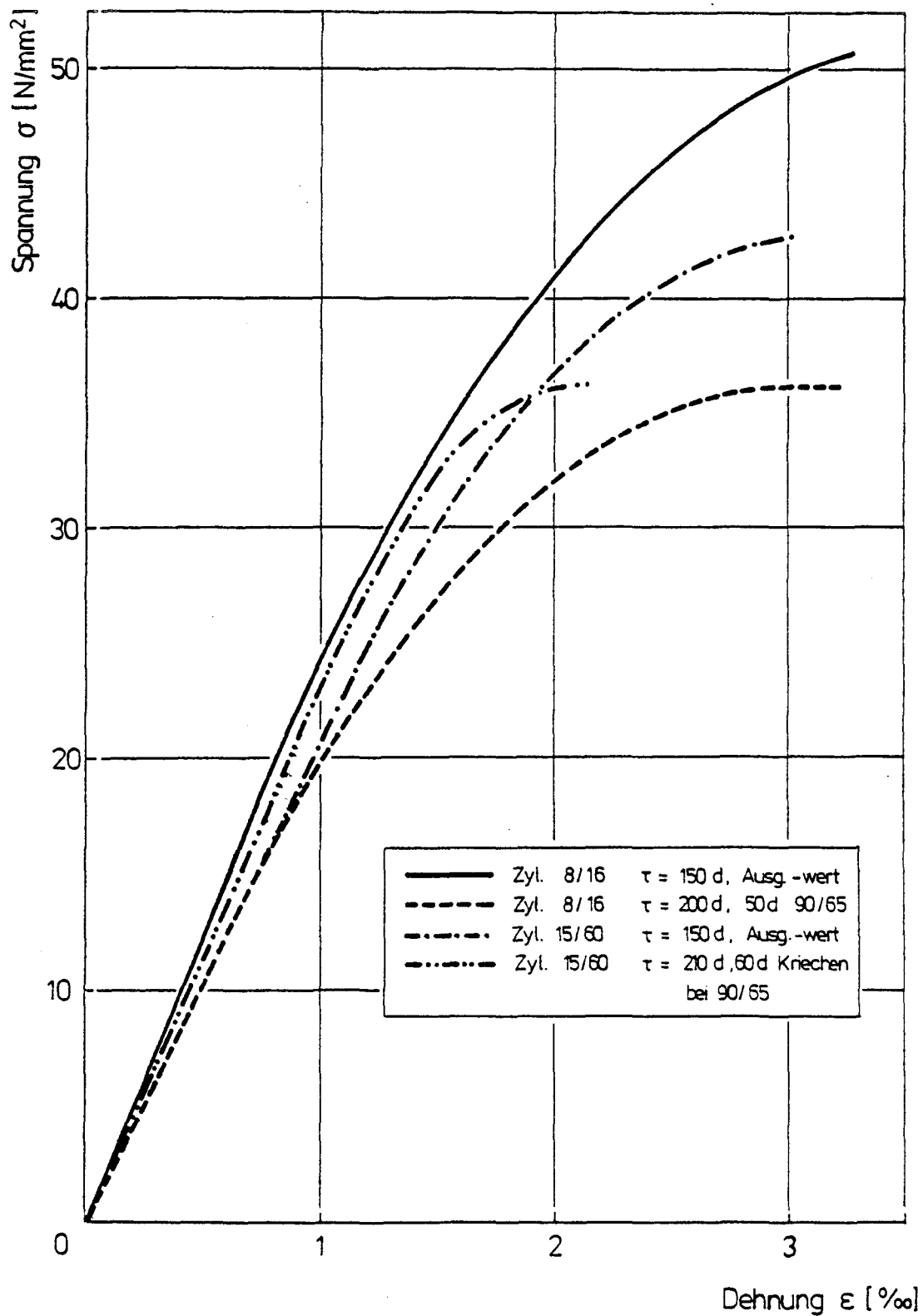


Bild 22 : σ/ϵ - Linien für 90/65 stat.

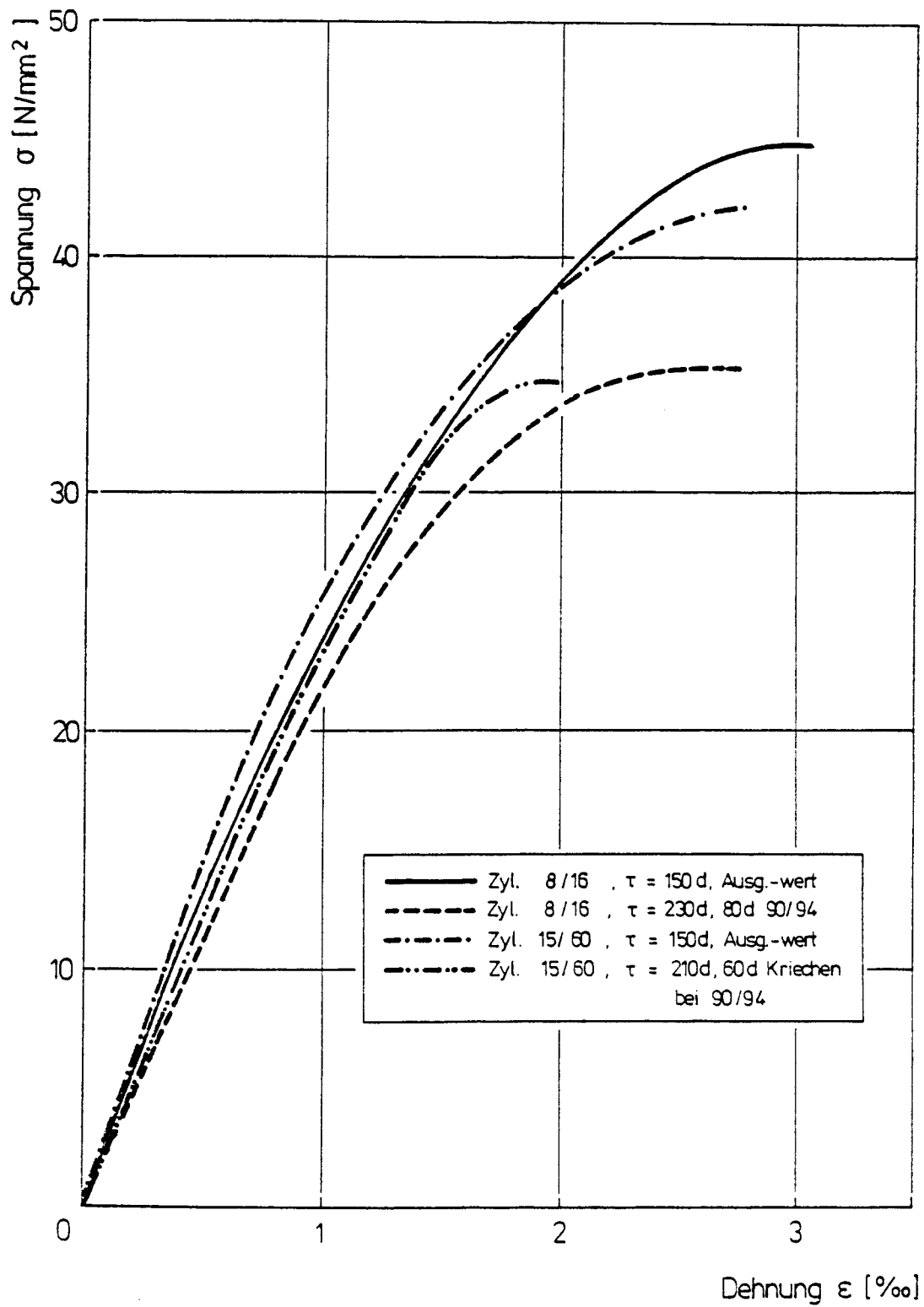


Bild 23 : σ/ε - Linien für 90/94 stat.